

⑬ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑪ **DE 3839707 A1**

⑳ Aktenzeichen: P 38 39 707.2  
㉑ Anmeldetag: 24. 11. 88  
㉒ Offenlegungstag: 31. 5. 90

⑤ Int. Cl. 5:  
**H01 J 37/256**  
H 01 J 37/073  
H 01 J 37/153  
// G01R 31/305

DE 3839707 A1

㉓ Anmelder:  
ICT Integrated Circuit Testing Gesellschaft für  
Halbleiterprüftechnik mbH, 8011 Heimstetten, DE

㉔ Vertreter:  
Tetzner, V., Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Dr.jur., Pat.- u.  
Rechtsanw., 8000 München

㉕ Erfinder:  
Feuerbaum, Hans-Peter, Dr., 8000 München, DE;  
Frosien, Jürgen, Dr., 8012 Ottobrunn, DE

⑤④ Verfahren zum Betrieb eines Elektronenstrahlmeßgerätes

In modernen Elektronenstrahlmeßgeräten wird die thermische La/B6 bzw. Feldemissionsquelle durch einen mit einem gepulsten Laserstrahl beaufschlagte Photokathode ersetzt. Da die Breite der Photoelektronenimpulse etwa der Breite der Laserimpulse entspricht, sind diese Geräte insbesondere für stroboskopische Messungen in schnellen Gallium-Arsenid-Schaltungen geeignet. Der apparative Aufwand zur Erzeugung der Photoelektronenimpulse ist allerdings beträchtlich, da Mittel zur Verdoppelung der Frequenz des primären Laserlichtes erforderlich sind. Es wird deshalb vorgeschlagen, die Kathode des Elektronenstrahlmeßgerätes mit Photonen der Energie  $E_{ph} < W$  ( $W$ : = Elektronenaustrittsarbeit des Kathodenmaterials) zu bestrahlen und die Austrittsarbeit mit Hilfe eines äußeren elektrischen Feldes soweit zu reduzieren, daß Photoemission, aber noch keine Feldemission einsetzt.

DE 3839707 A1

Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zum Betrieb eines Elektronenstrahlmeßgerätes.

Aus Appl. Phys. Lett. 51 (2), 1987, Seite 145 bis 147 ist ein Elektronenstrahlmeßgerät bekannt, dessen thermische LaB6- bzw. Feldemissionsquelle durch eine mit einem gepulsten Laserstrahl (Impulswiederholfrequenz  $\gamma = 100$  MHz, Impulsbreite  $\approx 1$  bis 2 ps) beaufschlagte Photokathode ersetzt wurde. Da die Breite der erzeugten Photoelektronenimpulse etwa der Breite der Laserimpulse entspricht, ist dieses Gerät insbesondere für stroboskopische Messungen in schnellen Gallium-Arsenid-Schaltungen geeignet. Der apparative Aufwand zur Erzeugung der Photoelektronenimpulse ist allerdings beträchtlich. So ist eine zweimalige Frequenzverdoppelung des primären Laserlichtes ( $\lambda = 1064$  nm) notwendig, um Photoelektronen aus der als Kathode dienenden Goldschicht (Elektronenaustrittsarbeit  $W = 4,5$  eV) auszulösen.

Aus dem J. Phys. E: Sci. Instrum 20 (1987), Seiten 1491 bis 1493 ist ein Rasterelektronenmikroskop bekannt, dessen Wolframkathode mit Hilfe eines gepulsten Laserstrahls innerhalb weniger Nanosekunden auf Temperaturen oberhalb des Schmelzpunktes aufgeheizt und dadurch zur thermischen Emission von Elektronen angeregt wird. Auch in diesem Gerät ist eine Frequenzverdoppelung der in einem Nd-YAG-Laser erzeugten Primärstrahlung notwendig. Außerdem entsteht bei höheren Laserenergien ein zweiter Elektronenimpuls, der mit Hilfe eines Ablensystems ausgeblendet werden muß. Zudem ist die Lebensdauer der Kathode in Folge der hohen Abdampftrate des Kathodenmaterials begrenzt.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zum Betrieb eines Elektronenstrahlmeßgerätes anzugeben, mit dem Photoelektronenimpulse ohne eine Frequenzverdoppelung des primären Laserlichtes erzeugt werden können. Außerdem soll der Sondenstrom deutlich erhöht werden. Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch Verfahren nach den Patentansprüchen 1 und 2 gelöst.

Der mit der Erfindung erzielbare Vorteil besteht insbesondere darin daß man konventionelle Laserquellen zur Erzeugung der Photoelektronenimpulse verwenden kann.

Die Unteransprüche betreffen vorteilhafte Weiterbildungen und Ausgestaltungen der Erfindung, die im folgenden anhand der Zeichnung näher erläutert wird. Hierbei zeigt:

Fig. 1 ein Elektronenstrahlmeßgerät,

Fig. 2 und 3 Elektronenstrahlerzeuger,

Fig. 4 ein Element einer Multipoloptik zur Korrektur des Öffnungs- und/oder Farbfehlers einer Objektivlinse.

Das in Fig. 1 schematisch dargestellte Elektronenstrahlmeßgerät umfaßt einen aus einer Feldemissionskathode  $K$ , einer Extraktionselektrode  $AE$  und einer Anode  $A$  bestehenden Strahlerzeuger, eine Laserquelle  $LA$ , insbesondere einen Nd: YAG-Laser, eine Optik  $L$  zur Fokussierung der impulsförmig emittierten Laserstrahlung  $LS$  ( $\lambda = 1064$  nm, Impulswiederholrate  $\gamma = 100$  MHz) auf die Kathodenspitze, eine Kondensorlinse  $KL$ , einen aus mindestens vier Acht- oder Zwölfpolelementen  $K1$  bis  $K4$  bestehenden Korrektorko und eine Objektivlinse, die ein von der Kondensorlinse  $KL$  erzeugtes Zwischenbild der Photoelektronenquelle verkleinert auf das in der evakuierten Probenkammer angeordnete Bauelement  $IC$  abbildet. Die Objektivlinse,

mit der man sowohl die Photoelektronen als auch die an einer Meßstelle ausgelösten Sekundärelektronen in jeweils einen auf der optischen Achse  $OA$  liegenden Punkt fokussiert, besteht im wesentlichen aus einer kurzbrennweitigen Magnetlinse  $OL$ , einer Ablenkeinheit  $AS$  und einem Sekundärelektronenspektrometer  $SP$  zur Bestimmung des Meßpunktpotentials. Der Fokus der im Feld einer Absaugelektrode beschleunigten Sekundärelektronen liegt hierbei im Zentrum eines kugelsymmetrischen elektrischen Gegenfeldes, das sich in dem oberhalb des Linsenkörpers angeordneten Spektrometerteil zwischen zwei annähernd halbkugelförmigen Elektroden aufbaut. Sekundärelektronen mit Energien oberhalb einer durch das Spektrometerfeld definierten Mindestenergie werden in zwei symmetrisch zur Strahlachse  $OA$  angeordneten Detektoren  $DT$  nachgewiesen.

Da die Photonenenergie  $E_{ph} = 1,17$  eV ( $\lambda = 1064$  nm) nicht ausreicht, Elektronen aus der Wolframkathode  $K$  (Spitzenradius  $\gamma_0 = 0,1$  bis  $0,5$   $\mu$ m, Austrittsarbeit  $W \approx 4,5$  eV) auszulösen, wird die Potentialbarriere an der Grenzfläche Metall-Vakuum und damit die Austrittsarbeit erfindungsgemäß mit einem äußeren elektrischen Feld so weit reduziert, daß die Bedingung

$$W_{eff} \leq E_{ph}$$

$W_{eff}$  := Austrittsarbeit mit äußerem Feld

$E_{ph}$  := Photoenergie

erfüllt ist. Das äußere Feld erzeugt man mit Hilfe der gegenüber der Kathode  $K$  positiv geladenen Extraktionselektrode  $AE$ . Deren Potential wird so vorgegeben, daß Photoemission, aber noch keine Feldemission einsetzt ("feldunterstützte Photoemission"). Die Feldstärke im Bereich der Kathodenspitze darf deshalb den für die Feldemission kritischen Wert von etwa  $10^6$  bis  $10^7$  V/cm nicht überschreiten. Im übrigen wird das Extraktionspotential durch die Photonenenergie, d. h., die Art des verwendeten Lasers  $LA$ , und die geometrischen Verhältnisse innerhalb des Strahlerzeugers (Spitzenradius der Kathode, Abstand Kathode  $K$  — Extraktionselektrode  $AE$ ) bestimmt. Um die auf Erdpotential liegenden Probe  $IC$  mit Elektronen der Energie  $E_{PE} = 1$  keV zu bestrahlen, kann man die Kathode  $K$  beispielsweise mit einem Potential  $U_K = -1$  kV, die Extraktionselektrode  $AE$  mit einem Potential  $U_{AE} = 0,5$  bis  $6$  kV und die Anode  $A$  mit einem Potential  $U_A = 0$  kV beaufschlagen. Es ist selbstverständlich auch möglich, die Photoelektronen zuerst auf eine hohe Energie von beispielsweise  $E_{PE} = 10$  keV ( $U_A = 9$  kV) zu beschleunigen, um sie dann unterhalb des Strahlerzeugers mit Hilfe einer Zusatzselektrode oder einem Immersionskondensor auf die gewünschte Endenergie abzubremesen.

Bei dem in Fig. 2 dargestellten Strahlerzeuger wird das Laserlicht  $LS$  mit Hilfe einer Linse  $L$  und eines ebenen oder parabolischen Spiegels  $US$  auf die Kathodenspitze fokussiert. Der mit einer Ausnehmung zum Durchtritt der Photoelektronen versehene Spiegel  $US$  ist hierbei zwischen zwei auf demselben Potential  $U_{AE}$  liegenden Extraktionselektroden  $AE1$  bzw.  $AE2$  angeordnet. Dieser Strahlerzeuger hat gegenüber dem in Fig. 1 dargestellten System den Vorteil, daß die Photoelektronen vorwiegend in Richtung der optischen Achse  $OA$  des Elektronenstrahlmeßgerätes emittiert werden.

Fig. 3 zeigt einen Strahlerzeuger, in dem die Kathode  $K$  mit Hilfe eines Heizstromes  $i$  auf eine Temperatur gebracht wird, bei der Photoemission, aber noch keine

thermische Emission einsetzt ("thermisch unterstützte Photoemission"). Der Heizstrom  $i$  ist deshalb so einzustellen, daß die Kathodentemperatur unterhalb des für thermische Emission kritischen Wertes von etwa 2000 K bleibt. Die Photoemission kann auch hierbei wieder durch ein von der Extraktionselektrode  $AE$  erzeugtes elektrisches Feld unterstützt werden. Es ist selbstverständlich auch möglich, das Laserlicht  $LS$  mit Hilfe der in Fig. 2 dargestellten Optik  $L/US$  auf die Kathode  $K$  zu fokussieren.

Zur Erhöhung des Sondenstromes ist das Elektronenstrahlmeßgerät mit einem aus mindestens vier Acht- oder Zwölfpolelementen  $K 1$  bis  $K 4$  bestehenden Korrektur  $KO$  ausgestattet. Diese aus Optik 34, Heft 3 (1971) Seiten 285 bis 311 (s. insbesondere Seite 3 und 8, Fig. 9) und den Proceedings zum 9. International Congress on Electron Microscopy, Toronto 1978, Vol. 3, Seite 186 bis 196 bekannte Multiploptik dient der Korrektur des axialen Farb- und/oder axialen Öffnungsfehlers der Objektivlinse, so daß man bei gleicher Auflösung wesentlich größere Aperturen  $\alpha$  zulassen kann. Da der Sondenstrom  $i_{PE}$  dem Quadrat der Objektivlinsenapertur  $\alpha$  proportional ist, die bei Verwendung eines Korrektors  $KO$  um etwa einen Faktor 10 vergrößert werden kann, erhöht der Sondenstrom  $i_{PE}$  sich gemäß der Beziehung  $i_{PE} \sim \alpha^2$  um einen Faktor 100.

Ein Element  $Ki$  ( $i = 1$  bis 4) des vorzugsweise unmittelbar oberhalb der Objektivlinse angeordneten Korrektors  $KO$  ist schematisch in Fig. 4 dargestellt. Es besteht aus acht auf dem Potential  $U_A$  der Anode  $A$  liegenden inneren Polschuhen  $PI$ , die durch einen zylinderförmigen Isolator  $IS$  von den auf Masse bzw. Erdpotential liegenden und mit jeweils einer Erregerspule  $S$  umgebenen äußeren Polschuhen  $PA$  getrennt sind. In jedem der Elemente  $Ki$  werden magnetische Quadrupol- und Oktupolfelder zur Korrektur des Öffnungsfehlers der Objektivlinse erzeugt. Zur Korrektur des Farbfehlers werden elektrische Quadrupolfelder aufgebaut, indem man die inneren Elektroden  $PI$  der beiden mittleren Multipolelemente  $K 2$  und  $K 3$  des Korrektors  $KO$  mit entsprechenden Zusatzpotentialen beaufschlagt.

Vier Acht- oder Zwölfpolelemente  $Ki$  reichen aus, um den axialen Öffnungs- und Farbfehler der Objektivlinse zu korrigieren. Die Verwendung von fünf Elementen bietet allerdings zusätzlich die Möglichkeit auch die außeraxialen Linsenfehler zu reduzieren. Mit der Korrektur des Öffnungsfehlers dritter Ordnung begrenzen die mit dem Abstand zwischen Korrektur  $KO$  und Objektivlinse  $ML$  anwachsenden Öffnungsfehler fünfter Ordnung die Auflösung. Auch deren Einfluß kann durch Verwendung zwölfpoliger Elemente erheblich reduziert werden, ohne die Korrekturen niedrigerer Ordnung zu beeinträchtigen.

Die Erfindung ist selbstverständlich nicht auf die beschriebenen Ausführungsbeispiele beschränkt. So kann das Verfahren insbesondere auch in einem Raster-Elektronenmikroskop angewendet werden.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zum Betrieb eines Elektronenstrahlmeßgerätes, das eine mit einem Photonenstrahl ( $LS$ ) beaufschlagte Kathode ( $K$ ), eine Anode ( $A$ ) zur Beschleunigung der auf der Kathode ( $K$ ) ausgelösten Elektronen in Richtung einer optischen Achse ( $OA$ ), eine Objektivlinse ( $ML$ ) und einen Detektor ( $DT$ ) zum Nachweis der auf einer Probe ( $IC$ ) ausgelösten Sekundärteilchen aufweist, dadurch

gekennzeichnet, daß die Kathode ( $K$ ) mit Photonen bestrahlt wird, deren Energie kleiner ist als die Elektronenaustrittsarbeit des Kathodenmaterials und daß die Austrittsarbeit mit Hilfe eines äußeren elektrischen Feldes soweit reduziert wird, daß Photoemission, aber noch keine Feldemission einsetzt.

2. Verfahren zum Betrieb eines Elektronenstrahlmeßgerätes, das eine mit einem Photonenstrahl ( $LS$ ) beaufschlagte Kathode ( $K$ ), eine Anode ( $A$ ) zur Beschleunigung der auf der Kathode ( $K$ ) ausgelösten Elektronen in Richtung einer optischen Achse ( $OA$ ), eine Objektivlinse ( $ML$ ) und einen Detektor ( $DT$ ) zum Nachweis der auf einer Probe ( $IC$ ) ausgelösten Sekundärteilchen aufweist, dadurch gekennzeichnet, daß die Kathode ( $K$ ) mit Photonen bestrahlt wird, deren Energie kleiner ist als die Elektronenaustrittsarbeit des Kathodenmaterials und daß die Kathode ( $K$ ) so weit aufgeheizt wird, daß Photoemission, aber noch keine thermische Emission einsetzt.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß eine die Photonen emittierende Quelle ( $LA$ ) impulsförmig betrieben wird.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Photonen in Richtung der optischen Achse ( $OA$ ) eingestrahlt werden.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Photonen mit Hilfe eines Spiegels ( $US$ ) in Richtung der optischen Achse ( $OA$ ) umgelenkt werden.

6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß der mit einer Ausnehmung versehene Spiegel ( $US$ ) im Strahlengang zwischen einer ersten und einer zweiten Extraktionselektrode ( $AE 1$ ,  $AE 2$ ) angeordnet wird.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß eine als Spitze ausgebildete Kathode ( $K$ ) verwendet wird.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß der axiale Farb- und/oder axiale Öffnungsfehler der Objektivlinse ( $ML$ ) mit Hilfe einer Multiploptik ( $KO$ ) korrigiert wird.

9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß eine aus mindestens 4 Acht- oder Zwölfpolelementen ( $K 1$ ,  $K 2$ ,  $K 3$ ,  $K 4$ ) bestehende Multiploptik ( $KO$ ) verwendet wird.

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

—Leerseite—

FIG 1

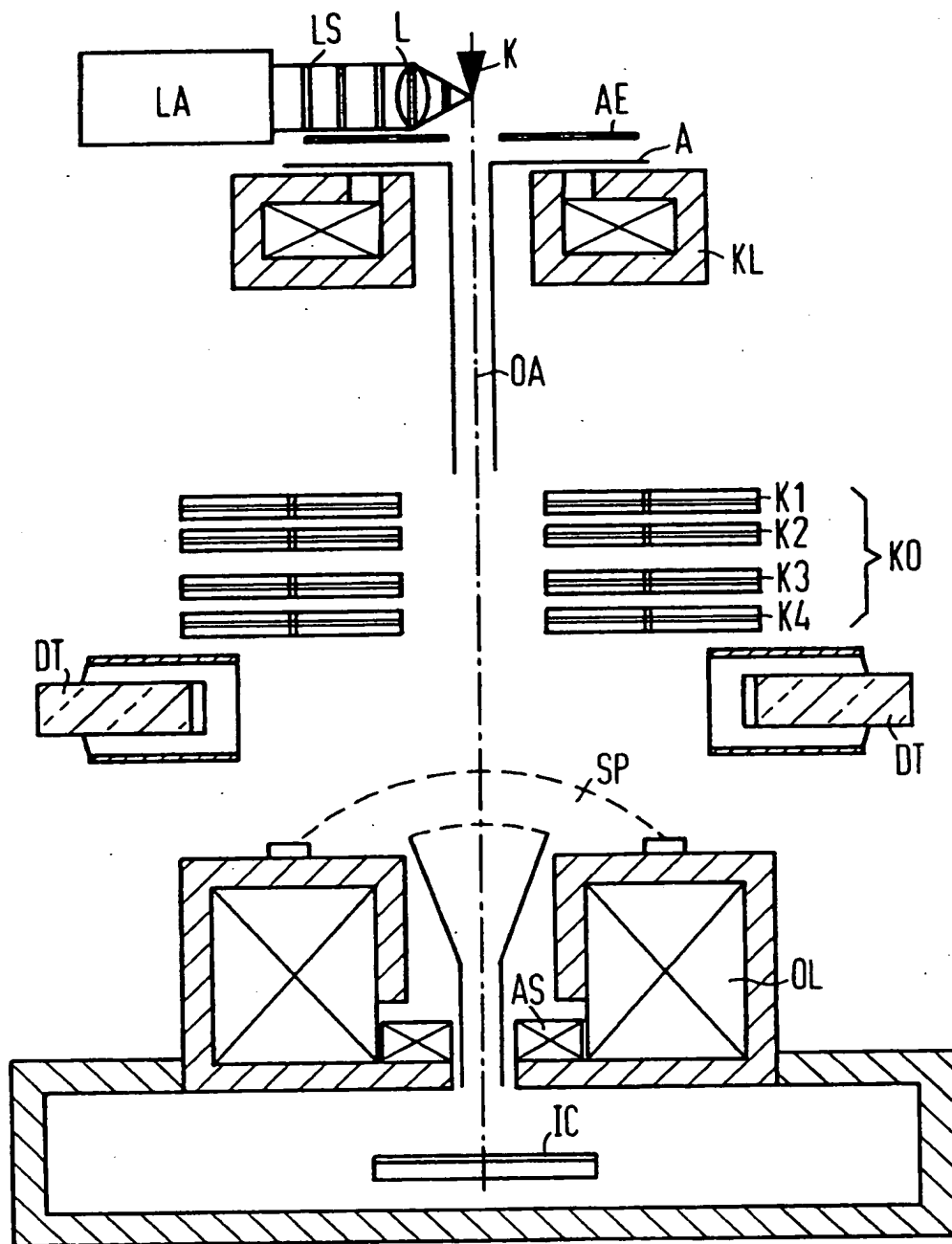


FIG 2

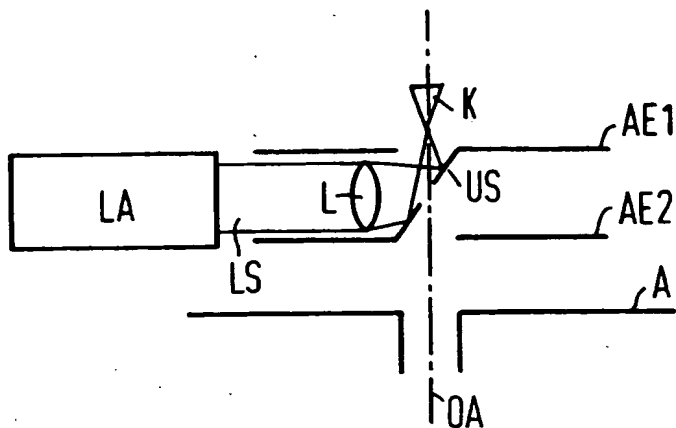


FIG 3

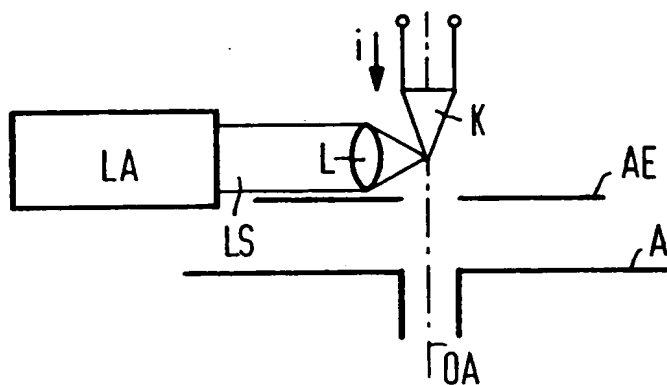


FIG 4

